УДК 626.039.553.34

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ПРИБОРНОМ ОТСЕКЕ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ СУЩЕСТВЕННО НЕСТАЦИОНАРНОМ ВНЕШНЕМ ТЕПЛООБМЕНЕ

Г.В. Кузнецов, С.Ф. Санду

Томский политехнический университет
E-mail: sandusf@ngf.tomsk.ru

На основе разработанной математической модели проведен вычислительный эксперимент по исследованию динамики процессов теплопереноса в H-образном информационно-логическом блоке современного космического аппарата связи при его орбитальной эксплуатации в существенно нестационарных условиях суточного цикла освещенности Солнцем. Сделана количественная оценка степени неоднородности температурных полей как приборов радиоэлектронной бортовой аппаратуры, так и основных элементов конструкции приборного отсека.

Современные искусственные спутники Земли, находящиеся на различных орбитах, используют для связи и телерадиовещания, дистанционного зондирования Земли, исследования ресурсов моря и суши, метеорологии и других целей. Они представляют собой долгоресурсные космические аппараты (КА), в процессе эксплуатации находящиеся в условиях комплексного воздействия внутренних и внешних тепловых нагрузок. Приборный отсек (ПО) такого КА представляет собой сборную негерметичную блочно-модульную конструкцию из прямоугольных трехслойных алюминиевых панелей с сотовым заполнителем [1] и собран из модуля полезной нагрузки (МПН) и модуля служебных систем. Модуль служебных систем состоит из вложенных друг в друга H-образного информационно-логического блока (ИЛБ) и П-образного энергодвигательного блока (ЭДБ) [2], рис. 1.

Внешний теплообмен ПО характеризуется периодическим полугодовым циклом освещенности Солнцем (панели «*Север*» и «*Юг*»). Применение H-образной конструкции ИЛБ позволяет дополнительно использовать панели «*Восток*» – (1) и «*Запад*» – (3) в качестве радиаторов. По этой причине внешний теплообмен в ИЛБ имеет существенно нестационарный характер в суточном цикле попеременно-периодического воздействия солнечного потока.

Ранее было проведено численное моделирование пространственных нестационарных температурных полей перспективных МПН и ЭДБ [3, 4], работающих в условиях стационарных внешних воздействий. Для ИЛБ такой анализ проведен только в рамках плоской модели теплопереноса [5], которая не учитывает ряд важных особенностей H-образной конструкции блока. Так, например, перенос тепловой энергии в такой системе по всем трем координа-

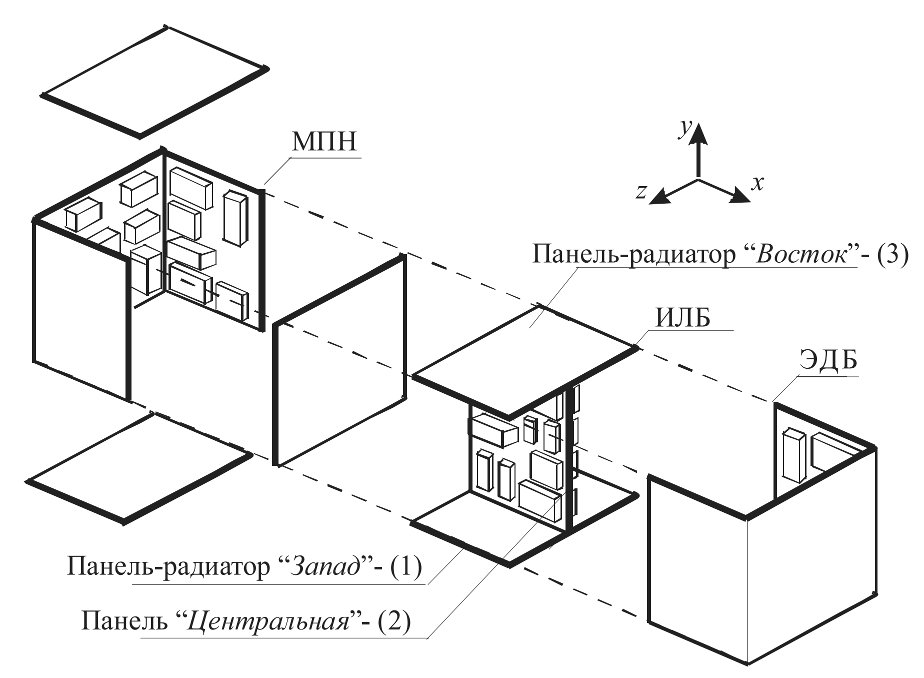


Рис. 1. *Общая схема блочно-модульной компоновки перспективного КА связи*

тным направлениям и связь между каждой из трех панелей играют важную роль в формировании теплового режима блока. По этим причинам представление каждой панели бесконечно тонкой пластиной или пластиной с бесконечно большой теплопроводностью может привести к достаточно большим погрешностям при численном моделировании.

Цель работы заключается в математическом моделировании теплопереноса в информационно-логическом блоке негерметичного ПО КА при его орбитальной эксплуатации в существенно нестационарных условиях суточного цикла освещенности Солнцем с учетом объемного характера переноса тепловой энергии.

Задача рассматривается на примере перспективного Н-образного ИЛБ, в котором приборной является панель «*Центральная*» – (2), имеющая двухстороннюю компоновку расположения приборов тепловыделяющей бортовой аппаратуры (БА). Блок выполнен из алюминиевых трехслойных сотовых панелей (1–3) с встроенной системой обеспечения теплового режима (СОТР) на основе нерегулируемых низкотемпературных тепловых труб (НТТ), связывающих в тепловом отношении панели – 1 и 3. Панели – 1, 3 открыты для теплообмена с космическим пространством. В качестве приборов рассмотрена типичная конструкция блока элементов радиоэлектронной аппаратуры кассетного типа с кондуктивными теплостоками, по которым осуществляется отвод тепла от плат с микромодулями к охлаждаемому основанию. Мощности источников тепловыделения считаются равномерно распределенными по областям, имеющим форму параллелепипедов и соответствующим отдельным функциональным элементам или группам элементов [6]. В этом случае задача сводится к решению системы трехмерных уравнений теплопроводности для N анизотропных параллелепипедов с заданным объемным распределением внутренних источников теплоты:

$$c_i\rho_i\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_{x\,i}\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_{y\,i}\frac{\partial T}{\partial y}\right)+$$
$$+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_{z,i}\frac{\partial T}{\partial z}\right)+q_v(x,y,z).$$

Здесь c – удельная теплоемкость; ρ – плотность; T – температура; t – время, λ_x, λ_y, λ_z – эффективные коэффициенты теплопроводности анизотропных элементов нагретой зоны; x, y, z – прямоугольные координаты; $q_v(x,y,z)$ – функция, учитывающая распределение мощности внутренних источников тепла; i=1,2,...,N – индекс элемента нагретой зоны.

Система уравнений теплопроводности для обшивок панелей, сотового заполнителя и корпусов тепловых труб имеет аналогичный вид за исключением источников тепла. На всех границах в местах контактов элементов внутренней структуры прибора между собой и с охлаждаемым основанием, основания прибора с обшивкой, обшивок с сотовым заполнителем приняты условия непрерывности тепловых потоков и температур [3, 4]:

$$\lambda_{x,i}\frac{\partial T_i}{\partial x}=\lambda_{x,i+1}\frac{\partial T_{i+1}}{\partial x},\quad T_i(z,y,t)=T_{i+1}(z,y,t),$$
$$\lambda_{y,i}\frac{\partial T_i}{\partial y}=\lambda_{y,i+1}\frac{\partial T_{i+1}}{\partial y},\quad T_i(x,z,t)=T_{i+1}(x,z,t),$$
$$\lambda_{z,i}\frac{\partial T_i}{\partial z}=\lambda_{z,i+1}\frac{\partial T_{i+1}}{\partial z},\quad T_i(x,y,t)=T_{i+1}(x,y,t).$$

Здесь λ_x, λ_y, λ_z – эффективные коэффициенты теплопроводности анизотропного сотового заполнителя. Для изотропных алюминиевых обшивок $\lambda_x=\lambda_y=\lambda_z$.

Радиаторные панели – 1 и 3 находятся в периодическом суточном цикле освещенности Солнцем. Можно считать, что космическое пространство поглощает все уходящее с радиационной поверхности тепло как идеально черное тело с нулевой температурой. Для внешних граней панелей – 1 и 3 принимались граничные условия, описывающие падающий поток солнечного излучения в виде периодических аналитических зависимостей для панелей-радиаторов – 1 и 3 соответственно:

$$\begin{cases} A_s S\sin\varphi\cdot\sin(\frac{\pi t}{12})=\lambda_z\frac{\partial T_i}{\partial z}-\varepsilon_w\sigma T_w^4, \\ \lambda_z\frac{\partial T_i}{\partial z}-\varepsilon_w\sigma T_w^4=0, \end{cases}\qquad 0<t\le 12;$$

$$\begin{cases} \lambda_z\frac{\partial T_i}{\partial z}-\varepsilon_w\sigma T_w^4=0, \\ A_s S\sin\varphi\cdot\sin\left[\frac{\pi(t-12)}{12}\right]=\lambda_z\frac{\partial T_i}{\partial z}-\varepsilon_w\sigma T_w^4. \end{cases}\qquad 12ч<t\le 24;$$

Здесь A_S – коэффициент поглощения прямого солнечного излучения; S – плотность теплового потока солнечного излучения; φ – угол между нормалью к поверхности панели-радиатора «*Север*» и «*Юг*» и направлением на Солнце; ε – интегральная степень черноты поверхности; σ – постоянная Стефана-Больцмана; w – индекс поверхности панели-радиатора.

Эффективный сброс избыточного тепла в окружающее космическое пространство осуществляется за счет нанесения специального терморегулирующего покрытия «оптический солнечный отражатель» на радиационные поверхности панелей (ε_w=0,85). Коэффициент поглощения прямого солнечного излучения изменяется во времени и зависит от степени деградации терморегулирующего покрытия при воздействии факторов космического пространства. Он изменяется от 0,08 в начале эксплуатации до 0,33 в конце 12–15-летнего срока активного существования КА [3]. Плотность теплового потока прямого солнечного излучения S зависит от положения Солнца при его видимом годовом движении по большому кругу небесной сферы (эклиптике). В точках зимнего и летнего солнцестояния S=1440 и 1350 Вт/м^2 соответственно. В точках весеннего и осеннего равноденствия S=1395 Вт/м^2 [3].

Математическое моделирование теплопереноса в нерегулируемых НТТ, встроенных в сотовый заполнитель, проводилось с использованием записанной в цилиндрических координатах осесимметричной математической модели работы СОТР в распределенных параметрах, описывающей гидродинамику и тепломассообмен в паровой и жидкой фазах рабочего вещества и кондуктивный теплоперенос в корпусе тепловой трубы [7].

На основе сформулированной математической модели был проведен вычислительный эксперимент с целью исследования динамики процессов теплопереноса в Н-образном ИЛБ перспективного ПО современного КА связи при его орбитальной эксплуатации в существенно нестационарных условиях суточного цикла освещенности Солнцем. Суммарная мощность тепловыделения приборов БА, расположенных на обеих сторонах приборной панели – 2 составила 650 Вт. Рассматривалась СОТР на основе сети аммиачных нерегулируемых НТТ, проложенных в восьми параллельных плоскостях. Эффективные коэффициенты теплопроводности анизотропных элементов нагретой зоны приборов БА рассчитывались по тепловым схемам элементарной ячейки, представленным в [6]: λ_y=3,3; λ_z=9,3; λ_x=9,3 Вт/(м·К). Эффективные коэффициенты теплопроводности анизотропного сотового заполнителя с ячейкой в виде шестигранника рассчитывались по эмпирическим зависимостям, приведенным в [3].

В качестве опорного варианта моделирования рассматривались типичные условия орбитальной эксплуатации КА в режиме сеанса связи в середине срока активного существования (7 лет, A_S=0,26 [3]) в точке весеннего равноденствия в суточном цикле освещенности Солнцем. Результаты моделирования работы ИЛБ в типичных условиях эксплуатации представлены на рис. 2–4. Характер и диапазон изменения во времени средних температур обшивок панелей – 1 и 3 позволяет оценить суммарную эффективность работы СОТР, рис. 2.

Рост средней температуры обшивок радиаторных панелей – 3 ($0<t\leq12$, кривые 3, 4) и 1 ($12<t\leq24$, кривые 1, 2) более, чем на 10 °С, обусловлен исключительно работой НТТ при переносе энергии, выделяемой приборами БА, и тепла солнечного излучения на радиаторные панели, находящиеся в указанные периоды времени в тени. С учетом того, что приборная панель – 2 не является радиаторной и имеет довольно высокую плотность двухсторонней компоновки расположения тепловыделяющих приборов БА, характер изменения средних температур обшивок этой панели (кривые 5, 6) также свидетельствует о том, что в условиях периодической освещенности радиаторных панелей Солнцем доминирующим является механизм переноса тепловой энергии с помощью НТТ. Следует отметить, что для большинства узлов и блоков радиоэлектронной аппаратуры, используемой в КА, диапазон рабочих температур составляет от –50 до +50 °С.

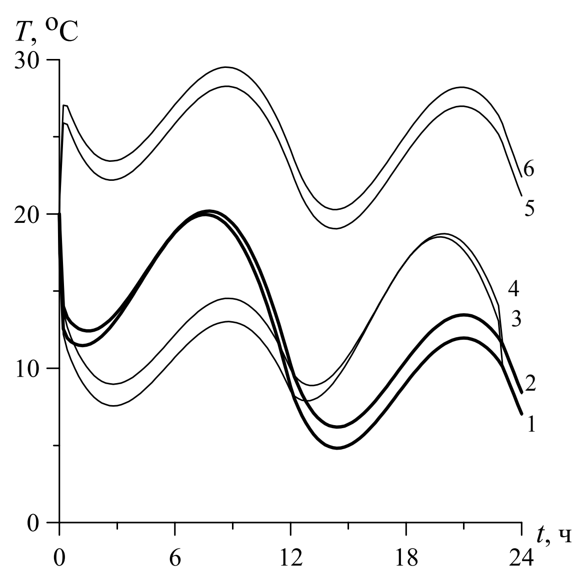


Рис. 2. Изменение во времени средней температуры обшивок радиаторных панелей 1 (кривые 1, 2), 3 (кривые 3, 4) и приборной панели 2 (кривые 5, 6) при орбитальной эксплуатации ИЛБ в суточном цикле освещенности Солнцем

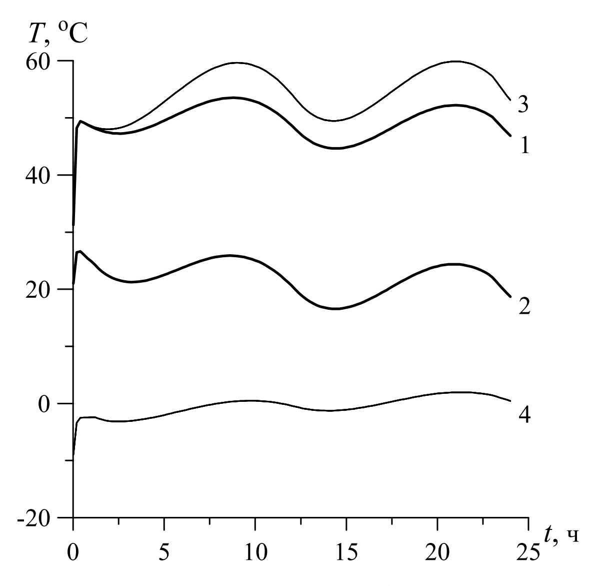


Рис. 3. Изменение температуры приборов БА во времени: 1) максимальной и 2) минимальной (опорный вариант); 3) максимальной, режим «Перегрев»; 4) минимальной, режим «Переохлаждение»

Известно [8], что увеличение температуры на 10 °С в области +40...+50 °С снижает основные показатели надежности на 50 %. Поэтому работа РЭА в малой окрестности максимальных температур нецелесообразна. Анализ динамики изменения суточной максимальной и минимальной температур приборов БА в типичных условиях орбитальной эксплуатации ИЛБ (рис. 3, кривые 1, 2) показал, что могут быть превышены предельные значения рабочих температур приборов радиоэлектронной БА (+50 °С и более). Кроме того, выявлена достаточно высокая степень неизотермичности (более

30 °С) распределения температурных полей по приборам одной панели. Дополнительно об этом может свидетельствовать анализ положения характерных изотерм наиболее теплонагруженной плоскости обшивки приборной панели – 2 в момент времени достижения максимального значения температуры приборов, рис. 4.

С целью оценки теплопереноса в ИЛБ при экстремальных условиях его работы, были смоделированы режимы «*Перегрев*» и «*Переохлаждение*». В режиме «*Перегрев*» рассмотрены условия орбитальной эксплуатации КА во время сеанса связи в конце срока активного существования (12–15 лет) в точке зимнего солнцестояния в суточном цикле освещенности Солнцем. Результаты вычислительного эксперимента показали, что в подобных условиях может быть значительно превышен диапазон максимально допустимых рабочих температур радиоэлектронных приборов БА (рис. 3, кривая 3). В режиме «*Переохлаждение*» учтены условия орбитальной эксплуатации КА в начале срока активного существования в точке летнего солнцестояния в суточном цикле освещенности Солнцем. Анализ соответствующих результатов моделирования показал, что в данных условиях приборы БА будут работать без существенного снижения показателей надежности (рис. 3, кривая 4).

Представляет интерес сравнение полученных результатов с соответствующими характеристиками температурных полей, полученными при использовании плоской нестационарной модели [5], не учитывающей также совместность протекания процессов теплопереноса в различных панелях. Такое сравнение показывает, что пространственная модель приводит к существенно меньшим отклонениям максимальных и минимальных температур от средних значений в идентичных условиях теплового воздействия как внешней среды, так и внутренних источников тепловыделения. При этом, отклонения составляют для плоской модели до 25 °С, а для пространственной – не более 12 °С. Учитывая вышеупомянутые ограничения, на диапазон рабочих температур радиоэлектронной аппаратуры КА, можно сделать вывод о существенно ограниченных возможностях плоских моделей. Следует отметить, что в рассматриваемых условиях учет реальных термических сопротивлений панелей в пространственной модели должен был приводить, на первый взгляд, к обратному эффекту: большим по сравнению с плоской моделью перепадам температур. Установленные закономерности могут быть объяснены тем, что плоские модели по существу не учитывают теплоаккумулирующую способность основных элементов конструкции КА – панелей. В экстремальных режимах работы теплоемкость конструкции играет значимую роль, снижая интенсивность разогрева в режиме «*Перегрев*» и увеличивая температуру панелей в режиме «*Переохлаждение*» при нестационарном внешнем воздействии. Полученные результаты показывают, что исследуемые процессы в такой сложной технической системе, как ИЛБ современного КА адекватно можно описать только при моделировании с применением пространственной нестационарной математической модели теплопереноса.

На основании результатов проведенных теоретических исследований можно сделать вывод о том, что характерными для Н-образного ИЛБ со-

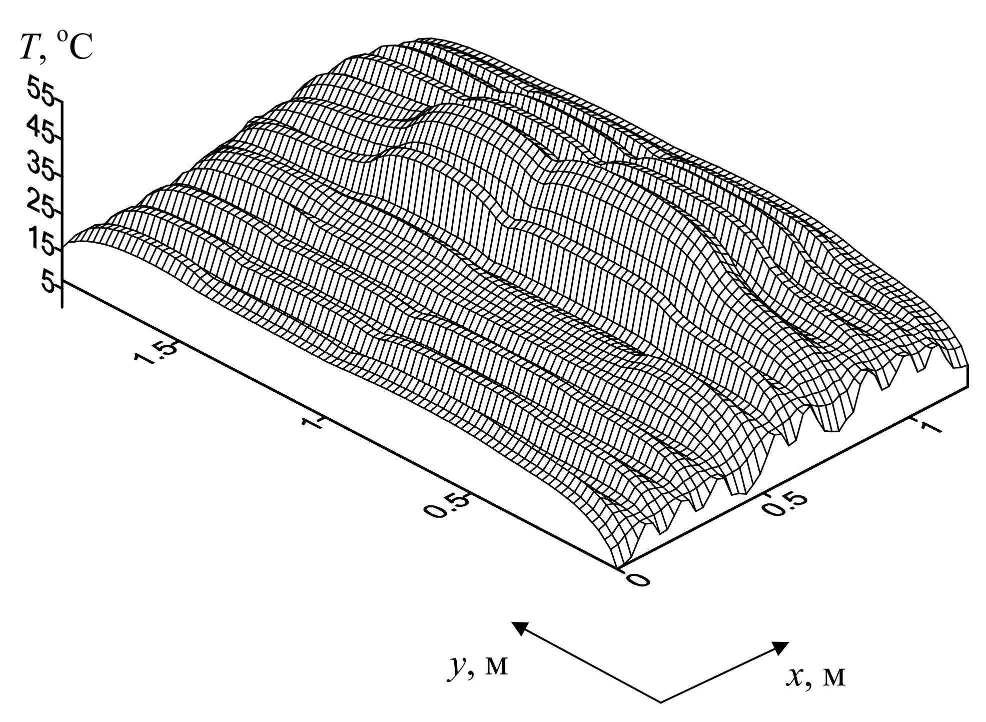


Рис. 4. *Положение характерных изотерм наиболее нагретой обшивки приборной панели 2 при достижении максимальной температуры приборов*

временного КА связи являются существенная нестационарность и неоднородность температурных полей всех панелей блока. Масштабы отклонений предельных значений температур от средних величин существенно отличаются от аналогичных данных, полученных с применением плоской нестационарной модели теплопереноса. Следовательно, наиболее перспективными для анализа температурных полей и тепловых режимов таких сложных конструкций, как Н-образный блок КА являются пространственные нестационарные модели теплопереноса, учитывающие основные механизмы переноса энергии и тепловую связь между отдельными элементами конструкции блока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панин В.Ф. Конструкции с сотовым заполнителем. – М.: Машиностроение, 1991. – 270 с.
2. Пат. 2092398 РФ. МКИ B64G 1/10. Космический аппарат блочно-модульного исполнения. / Е.А. Ашурков, В.П. Кожухов, А.Г. Козлов, Е.Н. Корчагин. Опубл. 10.10.1997, Бюл. № 28. – 4 с.
3. Ашурков Е.А., Бураков В.А., Козлов А.Г. и др. Математическое моделирование нестационарных теплофизических процессов в отсеках бортовой аппаратуры космических аппаратов // Известия вузов. Физика. – 1993. – № 4. – С. 119–128.
4. Кузнецов Г.В., Санду С.Ф. Математическое моделирование теплопереноса в накопителях энергии современных космических энергетических установок // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2003. – № 5–6. – С. 3–13.
5. Бураков В.А., Елизаров В.В., Корчагин Е.Н. и др. Тепловая математическая модель Н-образного блока негерметичного приборного отсека геостационарных космических аппаратов // Инженерно-физический журнал. – 2003. – Т. 76. – № 4. – С. 142–149.
6. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Высшая школа, 1984. – 247 с.
7. Кузнецов Г.В., Санду С.Ф. Математическое моделирование работы систем обеспечения теплового режима радиоэлектронной аппаратуры // Известия вузов. Приборостроение. – 2005. – Т. 48. – № 1. – С. 54–61.
8. Борисов А.А., Горбачева В.М., Карташов Г.Д., Мартынов М.И., Прытков С.Ф. Надежность зарубежной элементной базы // Зарубежная радиоэлектроника. – 2000. – № 5. – С. 34–53.

УДК 536.46